

사용후핵연료 검증기술 연구

나원우, 차홍렬, 이영길, 홍종숙
한국원자력연구소

요 약

원자로에서 연소되고 나온 사용후핵연료는 영구 처분하기 이전에 대부분 수조(pool)속에 임시로 저장되어 관리되고 있다. 이와 같이 관리되고 있는 사용후핵연료속에 핵폭발 장치로 전용될 수 있는 매우 민감한 핵물질인 플루토늄이 다량 포함되어 있기 때문에, 원자력의 평화적 이용·개발을 위한 핵활동의 투명성을 확보하기 위해서는 국가사찰 수행시 현장 적용 가능한 사용후핵연료 검증 기술과 장비를 확보하는 것이 필요하다. 이를 위해 사용후핵연료봉 및 사용후핵연료 집합체 검증을 위한 고분해능 감마선 분광분석 시스템을 개발하여 현장 테스트를 수행하였다. 이를 바탕으로 강화되는 핵비확산 체제와 통제관련 기술의 발전에 대비하고 우리 나라의 국가계량관리체제(SSAC) 확립에 필요한 자체적인 사찰 기술을 개발하여 국가사찰에 적용하는 것이 비파괴측정 기술 개발 목적이다.

1. 서론

우리 나라는 한-IAEA 보장조치 협정에 따라 국내 모든 원자력 활동에 이용되고 있는 핵물질, 장치 및 시설 등이 핵무기나 핵폭발 장치로 전용되지 않고 평화적으로 이용되고 있음을 대외적으로 증명하기 위하여 IAEA 보장조치를 받고 있다. 또한, 점차 규모나 활동 범위가 방대해지는 국내 원자력 산업을 효율적으로 통제 및 관리하며 이를 더욱 활성화시키기 위한 방안으로서 '96년부터 국내 보장조치 대상 시설에 대한 국가사찰을 실시할 예정이다. 이를 수행하기 위해서는 각 대상 시설별 핵물질 검증에 필요한 비파괴측정기술 개발이 필수 요소이다. 적절한 봉인 및 감시 시스템 하에 있는 핵물질에 대해 적절한 비파괴측정기술을 적용하여 각 측정 시료에서 방출되는 방사선을 측정함으로써 각각의 물질수지구역내 선연값에 대한 독립적인 검증을 할 수 있다. 따라서 본 연구의 목적은 국가사찰시 수조속에 저장되어 있는 사용후핵연료에 대한 계량관리자료를 검증하는데 필요한 데이터를 간접적으로 제공할 수 있는 검증 시스템을 개발하여 사찰현장에 적용하는데 있다.

2. 지표핵종 선정

사용후핵연료에서 방출되는 감마선을 검출하여 사용후핵연료의 특성들을 규명하기 위해서는 사용후핵연료속에 포함된 여러 핵분열 생성물 중에서 감마선을 방출하는 방사선 핵종에 대한 특성을 분석하여 적절한 지표핵종을 선정하여야 한다. 약 1년 이상 냉각된 사용후핵연료의 측정된 감마선 스펙트럼에서 분석될 수 있을 정도의 세기를 갖는 감마선원은 핵분열생성물 동위원소인 ^{106}Ru , ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{144}Ce , ^{154}Eu 등과 방사화된 핵연료 집합체 구조물질 및 피복관에서 방출되는 ^{54}Mn , ^{57}Co , ^{60}Co 등으로 제한된다[1]. 그 중 ^{137}Cs 이 ^{235}U , ^{239}Pu 에 대한 핵분열수율이 비슷하기 때문에 원자로나 핵연료의 종류에 크게 의존하지 않을 뿐만 아니라, 넓은 연소도 영역에서 ^{137}Cs 생성량은 연소도와 선형 비례하는 것으로 알려졌다.[2] 따라서 ^{137}Cs 은 사용후핵연료의 특성 및 연소도 등을 추정하는데 적용될 수 있는 최적의 핵분열생성물 동위원소이다. 이런 특성 때문에 수조속에 저장되어 있는 사용후핵연료를 검증하는데 ^{137}Cs 을 지표핵종으로 사용할 수 있다.

3. 사용후핵연료 검증 방법

수조속에 저장되어 있는 사용후핵연료를 현장에서 정성적으로 검증하기 위한 가장 간단한 방법으로는 수량 파악과 망원경 또는 수중카메라를 이용한 육안 검사에 의한 사용후핵연료 표면검사, 그리고 체렌코프 검출기를 이용한 체렌코프 방사선을 관찰하는 방법 등이 적용된다. 그러나 이와 같은 방법으로 사용후핵연료 진위 여부를 정확히 판별하는 것은 어렵기 때문에 사용후핵연료에서 방출되는 지표핵종을 검출할 수 있는 측정 방법 및 시스템이 요구된다. 따라서 고분해능 감마선 분광분석법을 이용해 사용후핵연료에서 방출되는 지표핵종의 감마선을 검출할 수 있는 적절한 측정 시스템을 구축한다면, 사용후핵연료 진위 여부 파악 및 각 연료봉별 연소도 비교 분석, 그리고 축방향 연소도 분포 등을 분석할 수 있다[3].

3.1 사용후핵연료봉 검증

수조속에 저장되어 있는 사용후핵연료 집합체 중 상부 노즐이 해체된 사용후핵연료 집합체의 각 연료봉별 진위 여부를 판별하기 위해서는 해체된 사용후핵연료 집합체의 각 연료봉에 대한 검증 기술이 요구된다. 이를 위해 현재 조사후시험시설(PIEF)내 수조속에 저장되어 있는 상부 노즐이 해체된 사용후핵연료 집합체의 각 연료봉을 집합체에서 인출하지 않고, 감마선 분광분석법을 이용해 사용후핵연료봉의 진위 여부를 정성적으로 판별하기 위한 방법을 개발하여 IAEA 사찰시 적용하고 있다. 이 방법은 수조속에 저장되어 있는 사용후핵연료봉에서 방출되는 감마선을 콜리메이터를 이용하여 수면밖으로 유도해 내 검출하여 감마선 스펙트럼을 분석하는 것이다. 이와 같은 스펙트럼 분석 결과에 의하여 사용후핵연료봉의 진위 여부를 판별할 수 있고 또한, 검출된 감마선 세기비를 이용하여 각 연료봉별 연소도 분포를 간접적으로 추정할 수도 있다. 이와 같은 측정실험에 필요한 장치는 그림 1과 같이 콜리메이터, 연료봉 선택용 인덱스, 콜리메이터 지지용 장치, 그리고 감마선을 검출하여 스펙트럼을 분석하는데 필요한 HPGe 검출기 및 다중과고분석기(MCA)등으로 구성된다. 이 시스템을 이용하여 핵연료봉에서 방출되어 콜리메이터를 통해 검출기에 검출된 감마선을 MCA로 스펙트럼을 수집한 후 지표핵종인 ^{137}Cs 의 662 keV 감마선 세기를 분석하여 각 핵연료봉의 진위 여부 판별 및 각 연료봉별 연소도 분포를 추정할 수 있도록 제작하였다[4].

3.2 사용후핵연료 집합체 검증

위에 언급한 사용후핵연료봉 검증 기술은 집합체 상부가 해체된 경우 연료봉을 인출하지 않고 직접 사용후핵연료봉을 검증하기 위한 기술이다. 반면 국가사찰시 수조속에 저장되어 있는 사용후핵연료 집합체의 진위 여부 판별 및 연소도 분포 검증을 위해서는 적절한 검증 기술이 요구된다. 이를 위해 수조속의 사용후핵연료 집합체에서 방출되는 지표핵종의 감마선을 검출하여 사용후핵연료 집합체가 갖는 여러 성질들을 규명할 수 있는 시스템은 다음과 같은 조건을 충족시켜야 한다. 첫째, 국가사찰시 현장 검증에 사용하기 위해 분해·조립이 가능하고, 방사성물질 제염이 용이하여야 한다. 둘째, 여러 형태의 핵연료 모형에 대한 시험도 가능하여야 한다. 셋째, 정해진 사찰기간 동안 가능한 많은 시료를 검증하기 위해 검출기와 시료간의 거리(SD)를 최소화하여 측정시간을 최소화해야 한다. 그림 2는 위에서 언급한 설계 조건들을 만족하도록 제작한 수중 감마선 측정장치(underwater gamma-ray measurement system)를 나타내는 것이다. 그림에서 보듯이와 같이, 본 장치는 방사선 검출기를 보호 및 차폐하고 있는 검출부(detection part)가 핵연료를 저장하고 있는 수조 속에 들어가게 되며 스텝핑모터(steping motor), 선형운동가이드(linear motion guide) 및 볼스크류(ball screw)등으로 구성되어 있는 구동부(driving part)는 수면 위에 위치한다. 그리고 수동 및 자동 조작으로 장치를 운전하기 위한 제어부(control part)와 검출된 신호를 수집 및 분석하기 위한 신호 처리부(signal processing part)등으로 구성되었다. 따라서 본 시스템을 이용해 사용후핵연료 집합체의 축방향 연소도 분포를 정확히 결정하기 위해 구동부를 작동하여 축방향으로 선원을 일정한 속도로 이동시키면서 각 지점별 선원에서 방출되는 지표핵종의 감마선 세기를 검출하여 축방향 연소도 분포 등을 분석할 수 있도록 제작하였다[5].

4. 실험결과

4.1 사용후핵연료봉 검증시스템(SFRV) 실험결과

사용후핵연료봉 검증 시스템을 이용하여 고리 1호기에서 1주기 연소된 후 현재 조사후시험시설(PIEF) 수조속에 저장되어 있는 A17 집합체(연소기간 : 78.4 ~ 79.10)를 측정된 결과는 그림 3과 같다. 상기 측정 결과에서 핵연료봉이 인출되고 없는 빈 홈(A14, D5, N1, G7)에서 검출되는 ^{137}Cs 감마선 세기(평균 : 164 counts/10 min)가 주변 방사능 세기(166 counts/10 min)와 비슷하다. 따라서 주변 핵연료봉에서 방출되는 ^{137}Cs (662 keV) 감마선들이 폴리에이더에 차폐되어 검출기에 영향을 거의 주지 않는 것으로 생각된다. 그리고 각 연료봉에서 검출되는 ^{137}Cs (662 keV) 감마선 세기가 각각 다른 이유는 각 연료봉마다 연소도에 약간의 차이가 있기 때문이며 또한, 폴리에이더 성질 상태에 의해 검출기가 핵연료봉을 보는 면적이 측정시마다 조금씩 다르기 때문인 것으로 생각된다. 이 시스템을 이용해 IAEA 사찰시 사용후핵연료 집합체(G23)에 대해 검증한 결과는 표 1과 같으므로 수조속에 저장되어 있는 상부 노즐이 해체된 사용후핵연료 집합체의 각 연료봉이 사용후핵연료인지 dummy인지를 정성적으로 검증할 수 있다.

4.2 사용후핵연료 집합체 측정시스템(GAMSEY) 실험결과

수중 감마선 측정시스템을 이용하여 $445\mu\text{Ci}$ 의 방사능 세기를 갖는 ^{137}Cs 액체 시료(직경: 58mm, 높이: 40mm)를 공기 중에서 다음과 같이 측정하였다. 시료가 폴리에이더 슬릿의 중앙에 위치한 상태 및 슬릿에서 벗어난 여러 위치에서 감마선 스펙트럼을 측정한 데이터는 그림 4와 같다. 그 결과 슬릿을 벗어난 위치로부터 검출기로 입사되는 ^{137}Cs (662 keV) 감마선의 검출 세기는 슬릿으로 입사되는 ^{137}Cs (662 keV) 감마선 검출 세기에 비해 약 10^{-3} 이하이다. 그 결과 차폐체(납)를 통하여 입사되는 감마선의 영향은 무시될 수 있음을 알 수 있다. 사용후핵연료 집합체 검증시 이 시스템을 이용하면 각 사용후핵연료 집합체의 진위 여부 판별 및 축방향 연소도 분포를 정성적으로 검증할 수 있다.

5. 결론

원자력의 평화적 이용·개발에 대한 국제사회의 신뢰도를 확보하기 위해서는 모든 원자력 활동은 투명성을 유지하여야 한다. 이를 위해 강화되는 핵비확산 체제와 통제관련 기술의 발전에 대비하여 한국의 통제관련 기술이 국제적으로 핵확산 방지에 기여할 수 있도록 추진되어야 한다. 그리고 국가계량관리체계(State System of Accounting and Control)의 확립을 바탕으로 한국의 자체적 검증 체제를 개발하여 IAEA에 최대한 기여함과 동시에 국가사찰에 적용할 수 있어야 한다. 이를 위해 사용후핵연료에서 방출되는 감마선을 감마선 분광분석법으로 측정하여 사용후핵연료가 갖는 여러 특성들을 분석할 수 있는 이와 같은 사용후핵연료 검증 시스템을 개발하여 실험한 결과 그림 3, 4와 같이 실험목적에 충족시켜 주었다. 따라서 향후 충분한 현장실험을 통하여 사찰관이 이용하는데 편리하도록 시스템을 개선한다면 국가사찰시 사찰현장에 적용할 수 있다고 본다. 그리고 물질수지구역간 사용후핵연료물질 이동이 요구되는 후행 핵주기 관련 연구에서 물질수지구역(Material Balance Area: MCA)간 핵물질 이동을 적절히 검증하는데 이 시스템을 적용할 수 있을 것으로 생각된다.

[참고문헌]

- [1] J.R. Phillips et al., "Application of Nondestructive Gamma-Ray and Neutron Techniques for the Safeguarding of Irradiated Fuel Materials", Los Alamos National Laboratory LA-8212, 1980.
- [2] J.R. Phillips et al., "Passive Nondestructive Assay of Nuclear Materials", Los Alamos National Laboratory, LA-UR-90-732.
- [3] Y.G. Lee et al., "Burnup Evaluation of Spent PWR Fuel by Measuring Gamma-Ray of Fission Product Cs-137", KNS Vol.24, No.2, p.178, 1992.
- [4] 홍중숙외, "핵물질 계량기술 개발연구", 한국원자력연구소, KAERI/RR-1194/92.
- [5] 홍중숙외, "핵물질 관리기술 개발", 한국원자력연구소, KAERI/RR-1431/94.

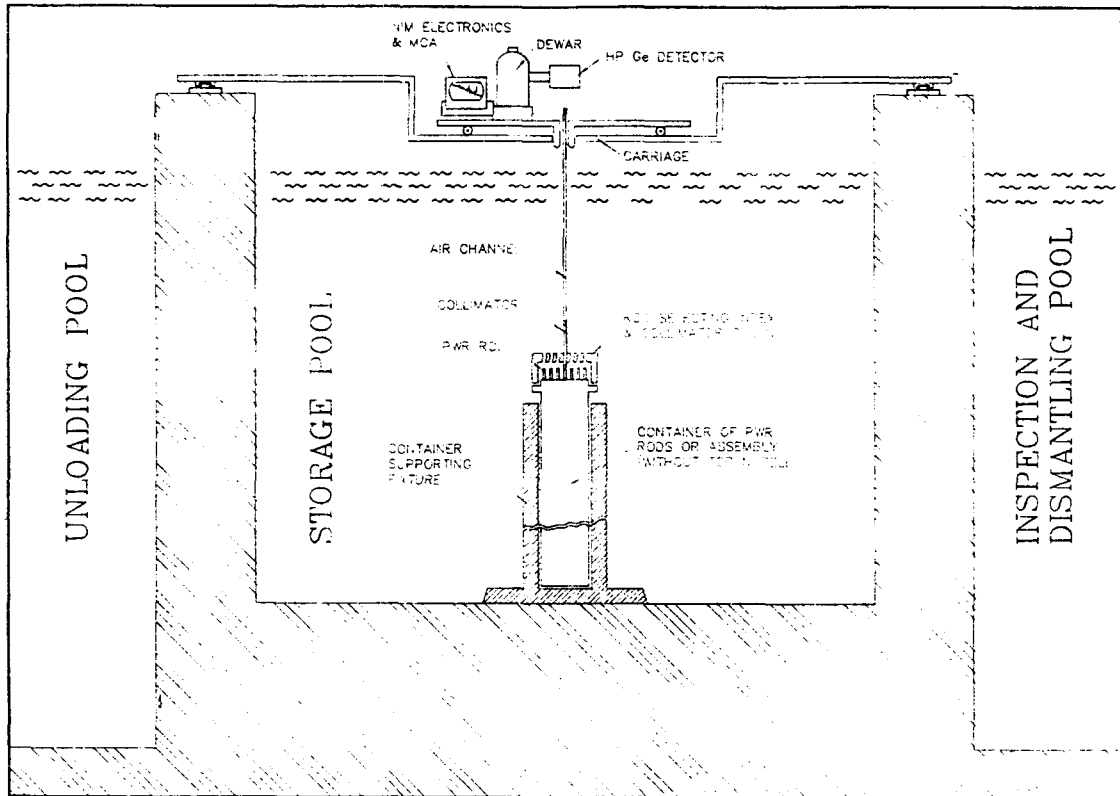


Fig.1 General Layout of the Spent Fuel Rod Verification System

Table 1. Measurement Results of Fuel Rod on Assembly(G23, C15, A39)

SAMPLES	NET AREA (Counts/1000sec)			SAMPLES	NET AREA (Counts/1000sec)		
	Cs-137 662 keV	Co-60 1173 keV	Co-60 1333 keV		Cs-137 662 keV	Co-60 1173 keV	Co-60 1333 keV
Background 1	3954	578	490	Background 1	371	23	21
Background 2	4979	1820	1446	Empty (C10)	366	75	80
Empty(G23-E3)	6412	1128	899	Rod (C15-I6)	1834	1208	1311
Empty(G23-A10)	6198	1248	988	Rod (C15-G5)	684	1119	1155
Rod (G23-H3)	71918	27229	25857	Rod (C15-C7)	862	795	833
Rod (G23-K12)	71252	34292	32767	Rod (A39-I8)	1007	497	341
				Rod (A39-I8)2rd	1023	530	353

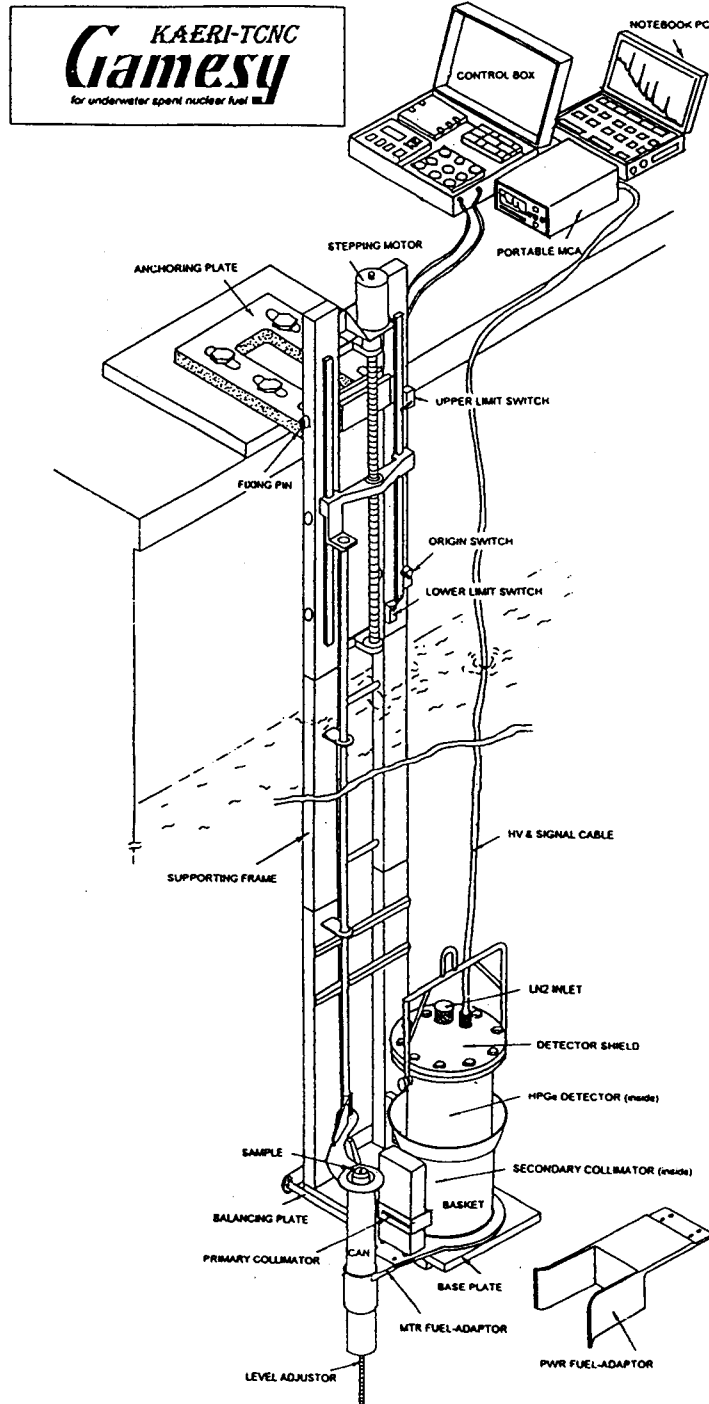


Fig.2 Schematic Diagram of the Underwater Gamma-Ray Measurement System for Spent Fuel

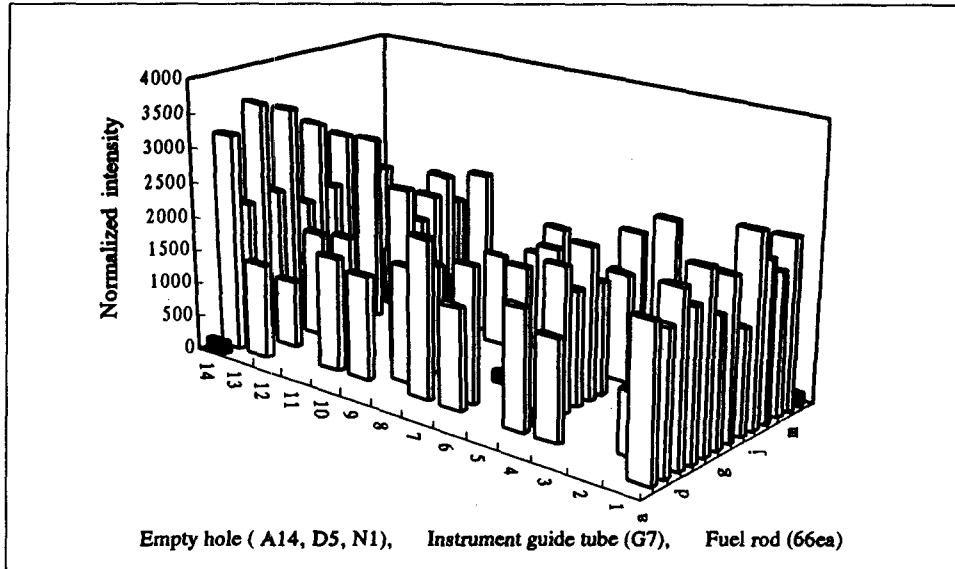


Fig. 3 Measurement Result of Fuel Rod Verification on Assembly A17

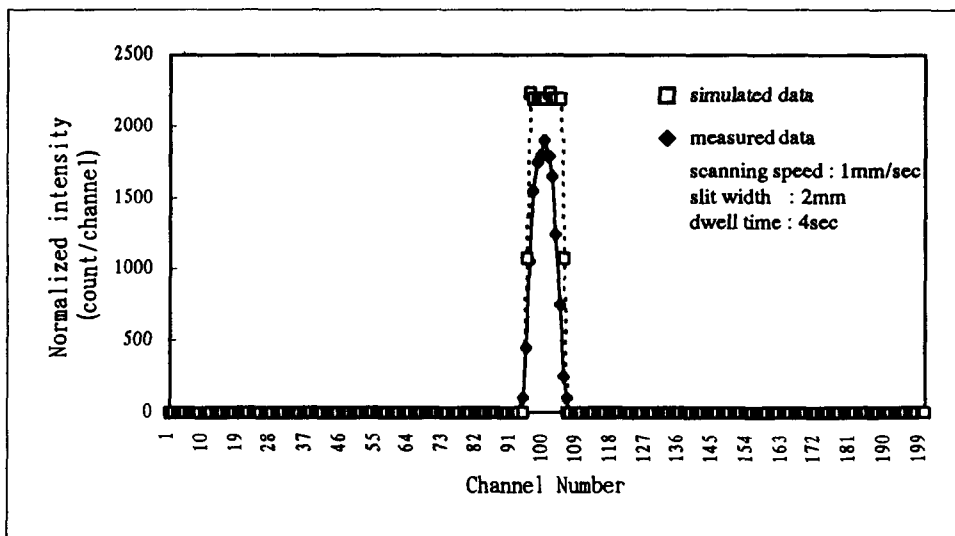


Fig. 4 Measurement Result of Gamma-Ray Scanning on the Cs-137(662keV)